Nondestructive ultrasound method for detecting flaws within narrow strip-type solid bodies

Patent number:	DE19803615
Publication date:	1999-08-05
Inventor:	COEN GUENTHER DR (DE); OBERHOFF DIETMAR (DE); LUHN ERNST (DE)
Applicant:	BETR FORSCH INST ANGEW FORSCH (DE)
Classification:	
- international:	***G01N29/04; G01N29/44;*** **G01N29/04; G01N29/44;** (IPC1-7): G01N29/10
- european:	G01N29/04E; G01N29/04F; G01N29/44M
Application number:	DE19981003615 19980130
Priority number(s):	DE19981003615 19980130

Abstract of **DE19803615**

A pair of guided ultrasound waves are produced within a solid body. Reflection waves from each wave are detected with an ultrasound detector and their signals are combined to detect flaws within the solid body. The two incident waves are of different modes. Preferably, the first wave is a Lamb wave and the second is a plane wave such as a rod or pipe wave.

(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**

(10) **DE 198 03 615 A 1**

(51) Int. Cl.[6]: **G 01 N 29/10**

(21) Aktenzeichen: 198 03 615.9
(22) Anmeldetag: 30. 1. 98
(43) Offenlegungstag: 5. 8. 99

DE 198 03 615 A 1

(71) Anmelder:
Betriebsforschungsinstitut VDEh-Institut für angewandte Forschung, 40237 Düsseldorf, DE

(74) Vertreter:
König, R., Dipl.-Ing.. Dr.-Ing.; Bergen, K. Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte, 40219 Düsseldorf

(72) Erfinder:
Coen, Günther, Dr., 40627 Düsseldorf, DE; Oberhoff, Dietmar, 42799 Leichlingen, DE; Luhn, Ernst, 42781 Haan, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Verfahren zur Fehlerartklassierung

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung, bei dem mindestens zwei unterschiedlich geführte Wellen (Moden) mit mindestens je einem spezifizierten Winkel im Festkörper erzeugt werden, die gemessenen Reflexionswerte in Bezug zu einem Referenzecho gesetzt werden, um einen relativen Reflexionswert zu erhalten und die relativen Reflexionswerte der einzelnen Moden wiederum in Relation zueinander gesetzt werden, wodurch sich die Fehler in ihrer Größe und Art bestimmen lassen.

DE 198 03 615 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung.

Derartige Verfahren werden zum Prüfen von Stäben, Drähten oder Platten eingesetzt.

Ein bekanntes Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung stellt das Wirbelstromverfahren dar. Hierbei werden Materialfehler durch Erzeugen eines Magnetfeldes im Wege der Induktion detektiert. Dieses Verfahren wird auch in Drahtprüfanlagen eingesetzt.

Beispielsweise zur Drahtprüfung ist es bekannt, Rotationsprüfanlagen zu verwenden. Bei der Drahtprüfung mit Rotationsdrahtprüfanlagen wird eine freie Ultraschallwelle im Material erzeugt, deren Reflexionsecho am Materialfehler detektiert werden kann.

Mit diesem Verfahren lassen sich jedoch Außenfehler, die den Großteil der Materialfehler ausmachen, nicht erkennen. Darüber hinaus lassen sich freie Wellen nicht in allen Körpern erzeugen. So ist beispielsweise in Drähten mit einem Durchmesser unter 15 mm eine Materialprüfung mit einer freien Welle nicht möglich.

Eine bekannte Ultraschallprüfmethode bedient sich einer eindimensional geführten Welle (Mode), die mit Hilfe eines Piezogebers erzeugt wird. Unter einer ein- oder zweidimensional geführten Ultraschallwellen versteht man eine elastische Welle, deren Wellenlänge in ein bzw. zwei Dimensionen vergleichbar oder groß zu den Linearabmessungen des Meßkörpers ist. Teile der Grenzfläche stehen ständig in Wechselwirkung mit der Welle und verursachen so eine Führung der Welle entlang dieser Grenzfläche. Dadurch wirkt der Körper als Wellenleiter.

Das Reflexionsecho der Welle läßt sich erfassen und gibt dann Aufschluß über die Existenz eines Materialfehlers. Aus der Amplitude des Echos läßt sich auch eine gewisse Aussage über die Fehlergröße herleiten. Diese Aussage beruht jedoch auf Erfahrungs- und Schätzwerten und stimmt häufig nicht mit den tatsächlichen Gegebenheiten überein. Fehleinschätzungen sind insbesondere auf Störechos, wie beispielsweise das Materialaußenwandecho oder Echos anderer Schallreflektoren zurückzuführen.

Aus der deutschen Offenlegungsschrift 41 33 648 ist es bekannt, Stäbe mit zweidimensional geführten Stabwellen zu prüfen. Dies erlaubt eine empfindliche Fehlerermittlung und Fehlergrößenbestimmung.

Durch Auswertung der Amplitude, des Laufwegs und der Dämpfung der Wellenreflexion am Fehler, läßt sich eine Fehlerquerschnittsfläche mit Hilfe der Ersatzfehlermethode errechnen. Der gemessene Reflexionswert enthält zwar implizit Informationen über die Fehlergröße und über die Fehlerart. Eine Aussage über die Fehlerart, d. h. die Exzentrizität des Fehlers ist aber nicht möglich, da keine Möglichkeit bekannt ist, eine Beziehung zwischen den Meßwerten und der Exzentrizität des Fehlers herzustellen. Alle Ansätze einer Fehlerartklassierung sind bisher gescheitert.

Bei der Prüfung von Bändern mit eindimensional geführten Plattenwellen ("Lamb-Moden") wurde durch den Anmelder bereits versucht, durch Verwendung eines Systems mit einer geführten Welle, die über zwei Einstrahlwinkel in den Prüfling eingestrahlt wird, die Exzentrizität der Materialfehler aus den beiden ermittelten Echos herzuleiten. Diese Versuche haben jedoch aufgrund der konkreten Materialeigenschaften nicht zum Erfolg geführt.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, ein Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung zu schaffen, das eine Fehlergrößenbestimmung und eine Fehlerartklassierung erlaubt.

Ein weiteres Problem der Erfindung besteht darin, ein schnelles Ermitteln der Fehlerart zu ermöglichen.

Das Problem wird gelöst durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem mindestens zwei unterschiedliche geführte Wellen (Moden) mit mindestens je einem spezifizierten Winkel im Festkörper erzeugt werden, die gemessenen Reflexionswerte in Bezug zu einem Referenzecho gesetzt werden, um einen relativen Reflexionswert zu erhalten und die relativen Reflexionswerte der einzelnen Moden in Relation zueinander gesetzt werden, wodurch sich die Fehler in ihrer Größe und Art bestimmen lassen.

Jeder Meßwert eines jeden Modes enthält dabei eine gekoppelte Information über die Fehlergröße und die Fehlerart. Durch Kombination der Informationen zweier geführter Wellen lassen sich die jeweiligen Werte für die Fehlergröße und für die Fehlerart getrennt und unabhängig voneinander ermitteln, indem der jeweils andere Wert eliminiert wird.

Die geführte Welle wird zunächst so eingestrahlt, daß sich ein Reflexionswert ergibt, der das Fehlerecho und ein Referenzecho enthält. Diese kann beispielsweise das Rückwandecho einer gemessenen Platte sein. Das Rückwandecho kann vom Fehlerecho unterschieden werden, da es eine längere Laufzeit besitzt. Mit dem Rückwandecho und dem Fehlerecho läßt sich das relative Fehlerecho jedes Modes ermitteln.

Als Referenzecho läßt sich jeder Schallreflektor einsetzen, wie beispielsweise eine Druckstelle einer Drahtumlenkrolle am Draht. Vorzugsweise wird als Referenzecho das größte ermittelbare Signal gewählt.

Das relative Fehlerecho wird für zwei unterschiedlich geführte Wellen (Moden) gemessen. Die Meßwerte werden in die für die betroffene Wellenart und den Wellenmoden gültigen implizierten Funktionen der Fehlerart und Fehlerfläche eingesetzt.

Aus der Kombination geeigneter Funktionen der gewählten Moden, die sich durch Entkopplung und Skalarisierung der Wellengleichungen für die Komponenten des Vektors der Teilchenverschiebung ermitteln lassen, läßt sich dann der Wert für die Fehlerart und die Fehlergröße für jede Art von geführten Wellen (Rayleigh-Wellen, Plattenwellen, Stabwellen, Rohrwellen) rechnerisch ermitteln.

Da es sich um eine zeitaufwendige Rechnung handelt und bei der Materialprüfung, wie beispielsweise bei der Ultraschallprüfung von kaltgewalztem Stahlband eine kontinuierliche Fehlerermittlung in Echtzeit am laufenden Band erwünscht ist, können die Reflexionswerte zur Beschleunigung der Fehlerermittlung vor dem Meßvorgang für eine gewünschte Zahl von Fehlergrößen und Fehlerarten errechnet werden, so daß während der Messung nur noch ein Vergleich des gemessenen Reflexionswertes mit den errechneten Reflexionswerten erforderlich ist, um schnell den detektierten Fehler nach Art und Größe bewerten zu können.

Zur Erhöhung der Genauigkeit des Meß- und Prüfsystems lassen sich die Randbedingungen an der Fehleroberfläche, d. h. die Normalkomponenten des Spannungstensors an den freien Oberflächen des Materials berücksichtigen. Denn ohne Berücksichtigung des Randwertproblems ist eine bestimmte Abweichung des gemessenen Reflexionswertes und des daraus ermittelten Fehlerwertes von der tatsächlichen Fehlergröße und Fehlerart gegeben, da zunächst von einer voll-

ständigen Reflexion des Fehlers ausgegangen wird und die tatsächliche Fehlergröße bzw. die randwertbedingte Abweichung der Fehlerreflexion von der vollständigen Reflexion nur aus Erfahrungswerten geschätzt wird.

Zur Berücksichtigung der tatsächlich auftretenden Randbedingungen, die zu einer Reflexionsverfälschung der Reflexion des Fehlers führen, müssen die Randbedingungen in die Fehlerberechnung direkt mit einfließen. Dazu werden zunächst die tensoriellen Randbedingungen durch geeignete Zerlegung des Vektors der Teilchenverschiebung in drei linear unabhängige Teilvektoren und durch Verwendung dreier geeigneter skalarer Potentiale skalarisiert.

Da eine vollständige Entkopplung für die Randbedingungen nicht möglich ist, wird eine aus der Quantenmechanik bekannte Näherungsmethode eingesetzt, um für die Praxis befriedigende Werte zu erhalten. Mit Hilfe der Störungsrechnung gelingt überraschenderweise bereits mit einer Näherung erster Ordnung eine gute Fehlerklassierung.

Im folgenden wird die Erfindung anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels des näheren erläutert.

Ein Beispiel für die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird im folgenden an der Fehlerermittlung für kaltgewalztes Stahlband mit zwei Moden für Plattenwellen erläutert, wobei der Ausgangspunkt die Ausbreitung einer elastischen Plattenwelle in einem elastischen, dämpfungsfreien, homogenen, nicht piezoelektrischen Festkörper bildet.

Konstruktiv ist zur Verwirklichung der Erfindung zunächst eine Anordnung der Ultraschallsender und -empfänger erforderlich, die eine Ausbreitung der geführten Welle in der Platte erlaubt und bei der Sende- und Empfangskegel sich im jeweiligen Intensitätsmaximum überlappen.

Eine solche Anordnung ist in der Zeichnung dargestellt, wobei Sender- und Empfängerpaare **1**, **2**, **3**, **4** oberhalb eines Stahlbandes **5** einer Kaltwalzstraße in bestimmtem Winkel so angeordnet sind, daß die Schallkegel **6**, **7** sich mit dem Empfangskegel **8**, **9** im Intensitätsmaximum schneiden. Empfänger und Sender sind bei einem Wandlerabstand von Wandlermitte zu Wandlermitte von 60 mm, einer Wandlerbreite von je 50 mm und einer Wellenlänge von 4 mm bei einem Abstand von ca. 0,4 mm vom Stahlband mit je 3,5° zur Vertikalen angeordnet. Der Winkel ist so gewählt, daß das Schallbündel nahezu divergenzfrei ist.

Der am jeweiligen Empfänger gemessene Wert wird zunächst in Relation zum gemessenen Referenzecho gebracht. Dieser relative Wert erlaubt nach entfernungsabhängiger Dämpfungs- und Divergenzkorrektur aufgrund folgender Überlegungen in Verbindung mit dem relativen Meßwert des anderen Empfängers die Ermittlung der Fehlerart und Fehlergröße, wobei für Stahlbänder vorzugsweise SH-Moden und Lamb-Moden zum Einsatz kommen.

In einer homogenen, isotropen, dämpfungsfreien, nicht piezoelektrischen, elastischen Platte der konstanten Dicke d breite sich eine Plattenwelle aus. Das kartesische Koordinatensystem (x_1, x_2, x_3) mit den Normaleneinheitsvektoren e_1, e_2, e_3 zur Beschreibung dieser Wellenausbreitung sei so gewählt, daß die Schallausbreitung in die x_1-Richtung falle, die beiden Plattenoberflächen parallel und symmetrisch zur Ebene $x_2=0$ liegen mögen und die Platte selbst durch die Ordnungsrelation $-d/2 \le x_2 \le +d/2$ charakterisiert werde.

Bedient man sich zur Formulierung des Randwertproblems und aller weiteren Berechnungen der Tensorrechnung und bezeichnet die Zeit mit t, die Dichte mit ρ, den Spannungsstensor mit T, den Vektor der Teilchenverschiebung mit u und den Vektor der Kraftdichte mit f, dann gilt bei Verwendung des ∇-Operators für die Plattenwelle die dynamische Grundgleichung

$$\nabla \cdot \mathfrak{T} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathfrak{u} - \mathfrak{f} \tag{1}$$

und die Materialgleichung

$$\mathfrak{T} = \mu\left[(\nabla \mathfrak{u}) + (\nabla \mathfrak{u})^T\right] + \lambda(\nabla \cdot \mathfrak{u})\mathfrak{I} \tag{2}$$

Die Quelle der Plattenwelle befinde sich bei $x_1=-\infty$. Dann gilt im Endlichen:

$$\mathfrak{f} \equiv \mathbf{0} \tag{3}$$

Aus (1), (2) und (3) folgt für den Vektor der Teilchenverschiebung sofort nachstehende Bewegungsgleichung:

$$\mu \Delta \mathfrak{u} + (\mu + \lambda)\nabla(\nabla \cdot \mathfrak{u}) - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathfrak{u} = \mathbf{0} \tag{4}$$

Diese Bewegungsgleichung läßt sich durch Einführung dreier geeigneter Potentiale φ, ψ, χ in drei skalare, entkoppelte Wellengleichungen aufspalten.

Die Randbedingungen für das Ausbreitungsproblem der monochromatischen elastischen Plattenwellen sind gegeben durch die Forderung des identischen Verschwindens der Normalkomponenten des Spannungstensors T an den beiden "freien" Oberflächen. Man erhält somit unmittelbar:

$$\left(\mathfrak{T} \cdot \mathfrak{e}_2\right)_{x_2=-\frac{d}{2}} \equiv \mathbf{0} \quad \wedge \quad \left(\mathfrak{T} \cdot \mathfrak{e}_2\right)_{x_2=+\frac{d}{2}} \equiv \mathbf{0} \tag{5}$$

Aus (5) folgt bei Beachtung von (2) sofort die Formulierung der Randbedingungen für den Vektor u der Teilchenver-

schiebung:

$$\begin{array}{lclcl} \left(\partial_2 u_1 + \partial_1 u_2\right)_{x_2=-\frac{d}{2}} \equiv 0 & \wedge & \left(\partial_2 u_1 + \partial_1 u_2\right)_{x_2=+\frac{d}{2}} \equiv 0 & \wedge & \\ \left(\lambda\partial_1 u_1 + (2\mu+\lambda)\partial_2 u_2\right)_{x_2=-\frac{d}{2}} \equiv 0 & \wedge & \left(\lambda\partial_1 u_1 + (2\mu+\lambda)\partial_2 u_2\right)_{x_2=+\frac{d}{2}} \equiv 0 & \wedge & \\ \left(\partial_2 u_3\right)_{x_2=-\frac{d}{2}} \equiv 0 & \wedge & \left(\partial_2 u_3\right)_{x_2=+\frac{d}{2}} \equiv 0 & ; & \end{array} \qquad (6)$$

Die Randbedingungen (6) lassen sich durch Einführung der drei skalarer Potentiale φ, ψ, χ zwar ebenso skalarisieren wie die Bewegungsgleichung (4), jedoch gelingt die Entkopplung nur teilweise: Die Potentiale φ und ψ bleiben miteinander gekoppelt, während das Potential χ und die damit verbundene Teillösung des Randwertproblems völlig entkoppelt ist.

Als Lösung des Randwertproblems in Platten ergeben sich die Plattenwellen: Die Eigenlösungen des gekoppelten Randwertproblems heißen Lamb-Moden, die Eigenlösungen, die mit dem Potential χ verknüpft ist, heißen SH-Moden.

SH-Moden

Die SH-Moden (SH = shear horizontal, horizontal zur Plattenoberfläche polarisierte Scherwellen) sind dadurch gekennzeichnet, daß der Vektor der Teilchenverschiebung immer parallel zur Plattenoberfläche gerichtet ist. Die SH-Moden sind nicht zu verwechseln mit den sich frei ausbreitenden Scherwellen, die manchmal SH-Wellen genannt werden. Lediglich für den niedrigsten SH-Mode (n = 0) stimmen die Teilchenauslenkungen überein, das heißt, die SH-Welle entspricht dem Mode SS_0.

Als Eigenwertgleichung ("Dispersionsgleichung") für die SH-Moden ergibt sich für die dimensionslose laterale Koordinate des Wellenzahlvektors der Tranversalwelle, die die Plattenwelle erzeugt:

$$\gamma_T = \frac{n\pi}{2} \quad \wedge \quad n \in \mathbb{N}_0 \qquad (7)$$

Da die SH-Moden als Plattenwellen zu der Klasse der eindimensional geführten Wellen gehören, kann die laterale Koordinate des Wellenzahlvektors k_T – wie aus (7) ersichtlich – nur diskrete Werte annehmen. Dabei repräsentieren die Eigenfunktionen zu den Eigenwerten mit geradzahligem Index n die Klasse der symmetrischen SH-Moden und die Eigenfunktionen zu den Eigenwerten mit ungeradzahligem Index n die Klasse der antisymmetrischen SH-Moden.

Der Vektor der Teilchenverschiebung speziell für den symmetrischen SH-Mode SS_0 ergibt sich zu:

$$\mathfrak{u}^{(SS_0)} = A^{(SS_0)} \cos\left[k\left(x_1 - c_T t\right)\right] \mathfrak{e}_3 \qquad (8)$$

Der reelle, zeitabhängige akustische Poynting-Vektor speziell für den symmetrischen SH-Moden SS_0 ergibt sich daraus zu:

$$\mathfrak{P}^{(SS_0)} = \rho c_T^3 k^2 A^{(SS_0)2} \sin^2\left[k\left(x_1 - c_T t\right)\right] \mathfrak{e}_1 \qquad (9)$$

Die Berechnung des Reflexionskoeffizienten eines Modes für eine Fehlstelle geschieht nun mit den Methoden der Störungstheorie: In nullter Näherung wird zunächst angenommen, daß der jeweilige Mode durch den Fehler nur insofern gestört wird, als die an der Fehlstelle ankommende akustische Leistungsflußdichte vom Fehlerquerschnitt vollständig, divergenzfrei und ohne Modenkonversion reflektiert wird. Die erste Näherung erhält man dann, indem man annimmt, daß sich die geführte Welle darstellen läßt als Superposition der ungestörten einfallenden Welle und einer Störwelle, die teilweise reflektiert und teilweise transmittiert wird. Die Störwelle wird ermittelt durch Erfüllung der zusätzlichen Randbedingung an der Fehleroberfläche. Dabei tritt zwangsweise Modenkonversion und Divergenz des Schallbündels auf.

Wählt man als Modellfehler ein Rechteck mit der relativen Seitenlänge ζ, der relativen Höhe η und der relativen Exzentrizität ε, dann ergibt sich der Reflexionsfaktor speziell für den symmetrischen SH-Mode SS_0 in nullter Näherung zu:

$$R^{(SS_0)} = \sqrt{\eta\zeta} \qquad (10)$$

Da die Formel (10) für den virtuellen Reflexionsfaktor des symmetrischen SH-Modes SS_0 von dem ebenen Modellfehlerrechteck nur die Parameter relative Fehlerlänge ζ und relative Fehlerhöhe η, nicht aber den Parameter relative Fehlerexzentrizität ε enthält, ist mit dem symmetrischen SH-Mode SS_0 allein zwar eine Fehlerdetektion nicht aber eine Fehlerartklassierung möglich.

Für die symmetrischen SH-Moden SS_m mit m > 0 lautet die entsprechende Formel:

$$R^{(SS_m)} = \sqrt{\eta\zeta\left[1 + \frac{\sin(2m\pi\eta)\cos(2m\pi\varepsilon)}{2m\pi\eta}\right]} \qquad (11)$$

Für die antisymmetrischen SH-Moden AS_m lautet die entsprechende Formel:

$$R^{(AS_m)} = \sqrt{\eta\zeta\left[1 - \frac{\sin((2m+1)\pi\eta)\cos((2m+1)\pi\eta)}{(2m+1)\pi\eta}\right]} \qquad (12)$$

Da die Formeln (5) und (6) für den Reflexionsfaktor in nullter Näherung alle drei relevanten Parameter ε, η und ζ des ebenen Modellfehlers enthalten, ist mit den Moden SS_m mit $m > 0$ und AS_m sowohl eine Fehlerdetektion als auch eine Fehlerartklassierung möglich.

Lamb-Moden

Die Lamb-Moden als Lösung des Randwertproblems geführter elastischer Wellen in einer isotropen, homogenen, nicht piezoelektrischen, dämpfungsfreien Platte sind dadurch gekennzeichnet, daß eine Verknüpfung zwischen der lateralen und der axialen Teilchenauslenkung besteht, so daß eine elliptisch polarisierte Schwingung entsteht.

Als Dispersionsgleichung für die symmetrischen Lamb-Moden ergibt sich gemäß

$$\begin{aligned} F(\Theta,\gamma;q) := {} & (\Theta-2)^2\cos\left(+\gamma\sqrt{q\Theta-1}\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta-1}\right) \\ & +4\sqrt{q\Theta-1}\sqrt{\Theta-1}\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta-1}\right)\cos\left(+\gamma\sqrt{\Theta-1}\right) = 0 \end{aligned} \qquad (13)$$

eine impliziten Funktionsgleichung für $\Theta = \Theta(\gamma; q)$, die sich jedoch analytisch nicht explizit darstellen läßt. Untersucht man die Funktionsgleichung (13) mit Mitteln der Funktionentheorie, so zeigt sich, daß es abzählbar unendlich viele Funktionszweige gibt, die sich nirgends schneiden und die daher eindeutig in aufsteigender Folge numeriert werden könnten. In Analogie zu den SH-Moden numeriert man jedoch nicht die dimensionlosen Eigenwerte Θ durch, sondern – beginnend bei Null – die zugehörigen Eigenlösungen. Wir wollen diese symmetrischen Lamb-Moden mit S_m bezeichnen.

Der Reflexionsfaktor für die symmetrischen Lamb-Moden S_m ergibt sich in nullter Näherung zu:

$$R^{(S_m)} = \sqrt{\zeta\frac{Z^{(S_m)}}{N^{(S_m)}}} \qquad (14)$$

Für die in (14) vorkommenden Hilfsgrößen gilt dabei:

$$
\begin{aligned}
&Z^{(S_=)} = 4\gamma\eta\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)\left(q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)+\gamma\eta\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot\\
&\sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)+2\left(q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1\right)\left(3\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-4\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot\\
&\frac{\sin\left(+2\gamma\eta\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}{+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}}\cos\left(+2\gamma\varepsilon\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)+\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-4q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)+4\right)\cdot\\
&\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-2\right)^2\sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\frac{\sin\left(+2\gamma\eta\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}{+2\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}}\cos\left(+2\gamma\varepsilon\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\\
&-2\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-2\right)\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-2q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)+4\right)\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\cdot\\
&\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot
\end{aligned}
$$

(15)

$$
\begin{aligned}
&\left\{\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right.\\
&\left.+\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right\}\\
&+2\left(\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-2\right)\left(q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1\right)\left(4-\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot\\
&\sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot\\
&\left\{\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right.\\
&\left.-\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_=)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right\}
\end{aligned}
$$

und

$$
\begin{aligned}
N^{(S_m)} = {} & 4\gamma\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)+\gamma\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot \\
& \sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)+2\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\left(3\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-4\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \frac{\sin\left(2\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}{\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}}+\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-4q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)+4\right)\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot \\
& \sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\frac{\sin\left(+2\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}{+2\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}}-2\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)\cdot \\
& \left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)+4\right)\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \qquad\qquad (16) \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}+\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}\right\} \\
& +2\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\left(4-\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}-\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}\right\}
\end{aligned}
$$

Da die Formeln (14) bis (16) für den Reflexionsfaktor der symmetrischen Lamb-Moden S_m in nullter Näherung den Parameter ζ explizit und die beiden Parameter η und ε implizit enthalten, ist mit diesen Moden sowohl eine Fehlerdetektion als auch eine Fehlerartklassierung möglich.

Für die antisymmetrischen Lamb-Moden A_m lassen sich in strenger Analogie zu den Formeln (14) bis (16) die korrespondierenden Formeln herleiten. Auch für die antisymmetrischen Lamb-Moden gilt dann, daß mit ihnen sowohl eine Fehlerdetektion als auch eine Fehlerartklassierung möglich ist. Vorzugsweise wird der Mode A_0 eingesetzt, da hier die Umsetzung in der Praxis die saubersten Meßsignale liefert, da sie durch nicht durch "Fremdmodensignale" von symmetrischen Moden überlagert sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Festkörperprüfung mit geführten Ultraschallwellen, bei dem eine erste und eine zweite geführte Ultraschallwelle mittels eines Ultraschallsenders in einem Festkörper erzeugt wird, Reflexionswellen der ersten und zweiten Ultraschallwelle mit einem Ultraschallempfänger detektiert werden und durch Kombination der detektierten Werte der ersten Welle und der detektierten Werte der zweiten Welle Strukturen oder Materialfehler im Festkörper ermittelt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, die Verwendung von Plattenwellen.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch die Verwendung von Rohr- oder Stabwellen.
4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß mit den Wellen eine Artklassierung und eine Größenermittlung von Materialfehlern durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Welle eine Lambwelle und die zweite Welle eine SH-Welle ist.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Lambwelle eine S-0 Welle und die SH-Welle eine S-1 Welle ist.
7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Fehlerauswertung dadurch beschleunigt wird, daß alle Reflexionswerte in einem erwarteten Bereich vor der Messung in Fehlerwerte umgerechnet werden und bei der Messung ein Vergleich der gemessenen Reflexionswerte mit den zuvor errechneten Werten erfolgt.
8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Ermittlung der Fehlerart und der Fehlergröße mit Hilfe des folgenden Zusammenhangs erfolgt:

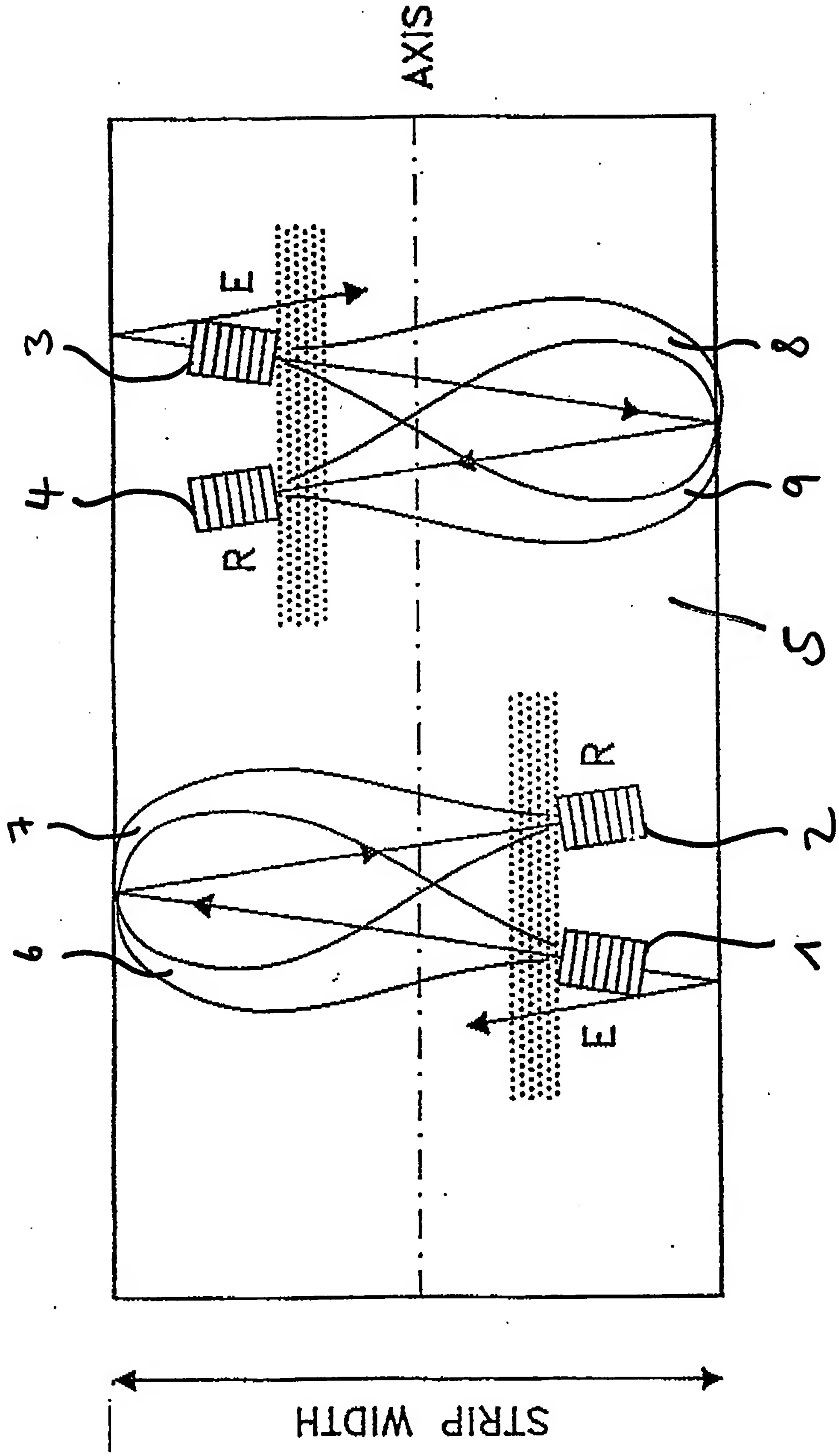
$$
\begin{aligned}
Z^{(s_-)} = {} & 4\gamma\eta\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)\left(q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)+\gamma\eta\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)\left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot \\
& \sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)+2\left(q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1\right)\left(3\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-4\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \frac{\sin\left(+2\gamma\eta\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}{+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}}\cos\left(+2\gamma\varepsilon\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)+\left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-4q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)+4\right)\cdot \\
& \left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-2\right)^2\sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\frac{\sin\left(+2\gamma\eta\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}{+2\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}}\cos\left(+2\gamma\varepsilon\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right) \\
& -2\left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-2\right)\left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-2q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)+4\right)\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right. \\
& \left.+\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right\} \\
& +2\left(\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-2\right)\left(q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1\right)\left(4-\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right. \\
& \left.-\frac{\sin\left[\gamma\eta\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)}\cos\left[\gamma\varepsilon\left(+\sqrt{\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(s_-)}(\gamma;q)-1}\right)\right]\right\}
\end{aligned}
\tag{15}
$$

und

$$
\begin{aligned}
N^{(S_m)} = {} & 4\gamma\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)+\gamma\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot \\
& \sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)+2\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\left(3\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-4\right)\sin^2\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \frac{\sin\left(2\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}{\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}}+\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-4q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)+4\right)\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)^2\cdot \\
& \sin^2\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\frac{\sin\left(+2\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}{+2\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}}-2\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)\cdot \\
& \left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)+4\right)\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \qquad (16) \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}+\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}\right\} \\
& +2\left(\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-2\right)\left(q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1\right)\left(4-\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)\right)\sin\left(+\gamma\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \sin\left(+\gamma\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\cdot \\
& \left\{\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}-\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}-\frac{\sin\left[\gamma\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)\right]}{\left(\sqrt{\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}+\sqrt{q\Theta^{(S_m)}(\gamma;q)-1}\right)}\right\}
\end{aligned}
$$

9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßwert eines Fehlers in Relation zu einem Referenzecho im Prüfmaterial gebracht wird und der relative Meßwert für die Ermittlung der Fehlerart und der Fehlergröße benutzt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen



AXIS
E
R
1
2
3
4
5
6
7
8
9
R
E
STRIP WIDTH